

Запропоновано технології адресної доставки енергії для інтенсифікації тепломасопереносу при переробці харчової сировини. У основі запропонованих гіпотез – хвильові технології комбінованої електромагнітної і вібраційної дії. Обґрунтовано механізми, ефекти і математичні моделі бародифузії і дії вібраційних полів. Запропоновано числа хвильової подібності, на основі яких узагальнені бази експериментальних даних по екстрагуванню і сушінню. Наведено результати оптимізації мікрохвильового екстрактора

Ключові слова: харчові технології, адресна доставка енергії, інтенсифікація масопереносу, екстрагування, сушіння

Предложены технологии адресной доставки энергии для интенсификации теплопереноса при переработке пищевого сырья. В основе предложенных гипотез – волновые технологии комбинированного электромагнитного и вибрационного действия. Обоснованы механизмы, эффекты и математические модели бародиффузии и действия вибрационных полей. Предложены числа волнового подобия, на основе которых обобщены базы экспериментальных данных по экстрагированию и сушке. Приведены результаты оптимизации микроволнового экстрактора

Ключевые слова: пищевые технологии, адресная доставка энергии, микроволновые технологии интенсификация массопереноса, экстрагирование

1. Введение

Обеспечение человечества энергетическими ресурсами является одной из ключевых проблем настоящего времени. Особенно это касается пищевых технологий, которые считаются одним из лидеров по потреблению энергетических ресурсов в экономически развитых странах [1, 2].

На пищевых производствах наблюдаются значительные потери энергии при переводе воды в пар в процессах сушки. Термическая обработка нередко приводит к перегреву, ухудшению качества продукта. При сушке фруктового и овощного сырья действие высоких температур разрушает ценные компоненты, такие как

витамины, антиоксиданты и ароматические вещества. В результате – ощутимые потери значительной части полезных свойств продукта. В процессах экстрагирования высокие температуры разрушают многие компоненты, которые желательно сохранить в продукте.

Таким образом, традиционные теплотехнологии обработки пищевого сырья приводят к двум основным проблемам: перерасходу энергии и потерям качества продукта.

Поэтому актуальны проблемы поиска инновационных решений, направленных на снижение термического воздействия на пищевое сырье, уменьшение удельных затрат энергии и нагрузки предприятия на окружающую среду.

УДК 664.023.061.3-048.34:66.021.3:004.94
DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108843

РАЗРАБОТКА ВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСА

О. Г. Бурдо

Доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой*

E-mail: burdo.onaft@gmail.com

В. Н. Бандура

Кандидат технических наук, доцент**

E-mail: bandura_3@ukr.net

А. В. Зыков

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: zav380@gmail.com

И. А. Зозуляк

Кандидат технических наук, ассистент**

E-mail: ihorzozulyak@gmail.com

Ю. О. Левтринская

Аспирант*

E-mail: levtrinska@ukr.net

Е. И. Маренченко

Аспирант*

E-mail: marenchenko.onaft@gmail.com

*Кафедра процессов, оборудования и
энергетического менеджмента

Одесская национальная академия пищевых технологий
ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039

**Кафедра процессов и оборудования
перерабатывающих и пищевых производств
им. проф. П. С. Берника

Винницкий национальный аграрный университет
ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В подавляющем большинстве пищевые технологии основаны на процессах термической обработки. Воду из сырья удаляют в вакуум-выпарных аппаратах и в сушильных установках. В значительной степени этот процесс определяет качество, затраты энергии и себестоимость производства готового продукта [3]. Именно здесь проявляются научно-технические противоречия между растущими требованиями к качеству, энергоемкостью производства пищевого продукта и техникой тепломассопереноса. В настоящее время активно ведутся поиски новых подходов в организации пищевых тепло-технологий. Развитие отрасли происходит в двух направлениях: совершенствование традиционного оборудования за счет оптимизации режимов работы [4], либо разработка нового оборудования [5]. Вакуум-выпарные установки хорошо изучены, предел совершенствования конструкции установок такого типа практически достигнут, за счет оптимизации режимов добиваются незначительного повышения энергетической эффективности данных аппаратов [6]. Однако в таких установках невозможно избежать воздействия высоких температур на продукт, что нежелательно при производстве концентратов соков и растительных экстрактов [7]. Особенно это касается соков с высокой антиоксидантной активностью и богатым набором витаминных комплексов [8], которые относятся к термолабильным веществам. При концентрировании соков вымораживанием все полезные компоненты продукта сохраняются [5]. Серьезные перспективы – за оборудованием на основе нанотехнологий, которое пока только развивается [9].

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является совершенствование пищевых теплотехнологий путем модернизации традиционных схем и разработки принципиально новых технологий тепломассопереноса, гарантирующих безопасность пищевого продукта при существенном снижении энергетических затрат.

Для достижения заданной цели были поставлены следующие задачи:

- объяснить механизмы интенсификации процессов тепломассопереноса в условиях вибрационных и электромагнитных полей;
- установить влияние конструктивных и режимных параметров на эффективность извлечения влаги из твердой фазы пищевого сырья;
- подтвердить практическую целесообразность принципов адресной доставки энергии в различных пищевых технологиях.

4. Методы математического и экспериментального моделирования процессов сушки и экстрагирования

В настоящее время важным резервом повышения энергетической эффективности пищевых технологий является интенсификация процессов тепломассопереноса. Предлагаемые авторами данной работы инновационные решения в этой плоскости основаны на следующих гипотезах.

Гипотеза 1. «Комбинированное воздействие теплового потока и волнового вибрационного поля способствует уменьшению толщины диффузионного пограничного слоя. А это приведет к интенсификации процесса влагоудаления, сокращению времени сушки и энергоемкости процесса обезвоживания».

Гипотеза 2. «Применение при экстрагировании и обезвоживании сырья адресной доставки электромагнитной энергии непосредственно к полярным молекулам жидкости в капиллярах позволит инициировать мощный, специфичный гидродинамический поток. В результате существенно повысится интенсивность массопереноса за счет резкого снижения внутреннего диффузионного сопротивления, уменьшатся энергетические затраты и время процесса».

Более детально методы математического и экспериментального моделирования процессов сушки и экстрагирования описаны в работе [10].

5. Механизмы, математические и экспериментальные модели процессов массопереноса в условиях вибрационных и электромагнитных полей

Рассмотрим механизмы действия инерционных сил на кинетику процессов массопереноса.

5.1. Бародиффузия и ее механизмы

Механизмы бародиффузии, движущие силы и возможные эффекты, которые интенсифицируют процесс массопереноса, иллюстрируются теплофизической моделью (рис. 1).

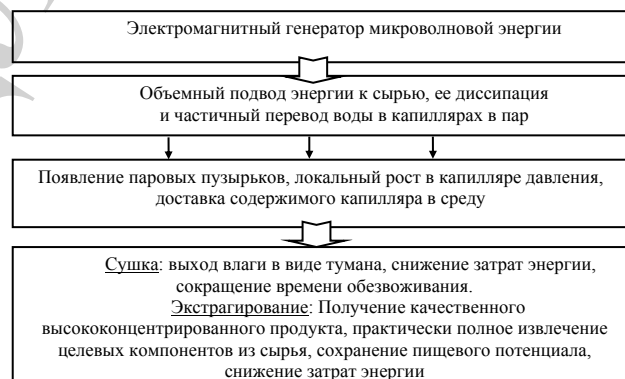


Рис. 1. Теплофизическая модель механизма и эффекта бародиффузии

В условиях воздействия микроволнового поля (рис. 2) диффузия в твердой фазе определяется по уравнению Фика, а массовый поток J_D , в данном случае, зависит от коэффициента диффузии D и градиента концентраций в твердом теле: $J_D = -D \cdot \text{grad} C_T$. Благодаря конвективной диффузии, происходит движение растворимых веществ из жидкой фазы X_G в центр потока, где концентрация водорастворимых веществ равна X_E . Интенсивность конвективной диффузии определяется коэффициентом массоотдачи β : $J_K = \beta \cdot (X_G - X_E)$. Наибольшие диффузионные сопротивления будут для нано- и микрокапилляров сырья, где наиболее тесные условия.

В системе зерно (1), капилляр (2), экстрагент (3) под влиянием МВ поля (рис. 2) возникает паровой пу-

зырь (4), который инициирует параллельно движению массовых потоков J_D, J_K , еще один поток J_B .

Частота выбросов и количество функционирующих капилляров увеличивается пропорционально электрофизическому воздействию. Поток, возникающий под действием электромагнитного поля, турбулизует приграничный слой, сопротивление может быть на порядок ниже, чем в традиционных схемах массоотдачи.

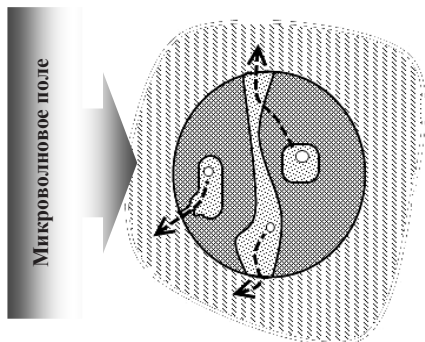


Рис. 2. Механизм бародиффузии

Массовый поток J_B (рис. 3) зависит от разности давлений в капилляре P_K и в потоке экстрагента P_E , а также от коэффициента массоотдачи β' , который может существенно отличаться от β : $J_B = \beta' \cdot (P_K - P_E)$. Давление, которое обеспечивает «запуск» бародиффузии $P_{BD} = P_E + P_K$.

$$P_{Ki} = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[\frac{\lambda \cdot l_i}{d_i} + \sum \xi \right] + \rho \cdot g \cdot l_i + \frac{\sigma}{d_i}. \quad (1)$$

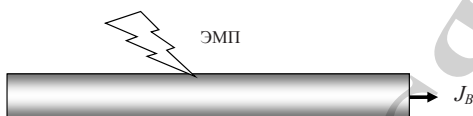


Рис. 3. Гидравлическая модель бародиффузии в условиях электромагнитного поля

В соотношении 1: d_i, l_i – диаметр и – длина капилляра, w – скорость жидкости в капилляре, ρ – плотность жидкости, ξ – местные сопротивления, σ – силы поверхностного натяжения, λ – коэффициент гидравлического трения, g – ускорение свободного падения.

Итоговое распределение концентраций экстрактивных веществ в системе определяется по принципу суперпозиции действия разнообразных по своей физической природе движущих сил.

При моделировании массопереноса от поверхности твердой фазы использовано известное решение [11] краевой задачи:

$$c(\tau, x, y) = \frac{1}{(1 - D\tau)^2} \left\{ \exp[(w_x + w_y)\tau - (|x| + |y|)] + D\tau \exp \frac{1}{\sqrt{D\tau}} \left[(w_x + w_y)\tau - (|x| + |y|) - \sqrt{D\tau} \left\{ \exp \left[\left(w_x + \frac{w_y}{\sqrt{D\tau}} \right) \tau - \left(|x| + \frac{|y|}{\sqrt{D\tau}} \right) \right] + \exp \left[\left(w_y + \frac{w_x}{\sqrt{D\tau}} \right) \tau - (|y| + \frac{|x|}{\sqrt{D\tau}}) \right] \right\} \right] \right\}. \quad (2)$$

Решение (2) предполагает также, что известно значение коэффициента диффузии D и соответствующие компоненты скорости. Так, даже приближенное решение задачи (2) зависит от решения уравнения Навье-Стокса.

Модель диффузии в стесненных условиях капилляра пористого тела составлена по классическим принципам. После записи уравнения диффузии в цилиндрических координатах с соответствующими граничными условиями, формулировки допущений, введением бесселевых функций первого рода I_0 и I_1 , при параболическом профиле скоростей концентрационное поле имеет вид:

$$\frac{X_p'' - X_p'}{X_E - X_p'} = 1 - \sum_{n=1}^n a_n \exp \left[-b_n \left(\frac{D}{w_{c.p} 0,25 d^2} \right) Z \right]. \quad (3)$$

Для моделирования бародиффузионного потока J_B привлечена задача диффузии из точечного источника в поток [11].

Поток экстрактивных компонентов A , выбрасываемых в поток экстрагента, который движется в направлении z с постоянной скоростью w_0 , определяется уравнением: $w_0(\partial X / \partial Z) D \nabla^2 X$, и следующими граничными условиями: $X|_{l \rightarrow \infty} = 0$; $4\pi l^2 D(\partial X / \partial r) = w_A$, при $l \rightarrow 0$; $l^2 = x^2 + y^2 + z^2$ (где l – расстояние от источника, z – расстояние по потоку от источника, w_A – скорость, с которой экстрактивные компоненты A входят в поток).

Если скорость потока постоянна (w_0), а режим стабилизировался, то:

$$X = \frac{w_A}{4\pi \cdot D l} \exp \left[- \left(\frac{w_0}{l D} \right) (l - z)^2 \right]. \quad (4)$$

Поскольку $J_B = X \cdot w_A \cdot \rho$, то поток вещества из точечного источника примет вид (5), а для одномерной задачи ($l = z$) упрощится (6):

$$J_B = \frac{\rho \cdot w_A^2}{4\pi D l} \exp \left[- \left(\frac{w_0}{l D} \right) (l - z)^2 \right], \quad (5)$$

$$J_B = \frac{\rho \cdot w_A^2}{4\pi D \cdot z}. \quad (6)$$

При ламинарном режиме вхождения экстрактивных компонентов в поток, скорость вхождения в поток w_A и величина потока определяются

$$w_A = \frac{\Delta P \cdot d^2}{32 \cdot \mu \cdot z}, \quad J_B = \frac{\rho \cdot \Delta P^2 \cdot d^4}{4096 \cdot \mu^2 \cdot z^3 \cdot \pi \cdot D}, \quad (7)$$

где μ – кинетический коэффициент вязкости среды, m^2/c ; d – диаметр капилляра, m ; $\Delta P = P_{BD} - P_E$ – разность давлений внутри открытой поры (капилляра) и в потоке экстрагента, Pa .

Бародиффузионный поток приводит к трудности разделения потоков J_D, J_K и J_B , поскольку явление бародиффузии вносит возмущения во все указанные составляющие процесса массопереноса целевого компонента в системе «сырье – экстрагент». Поэтому общий поток массы запишем в виде: $J_M = \beta_E \cdot (C_i - C_p)$, где β_E – эффективный коэффициент массоотдачи, учитывающий внутри-, внешне- и бародиффузионные процессы.

Очевидно, что даже при столь серьезных упрощениях задачи, которые сделаны при ее постановке,

совместные решения (2)–(7) весьма затруднительны. Гидродинамическая ситуация в потоке определяется турбулентным течением экстрагента, осложненным вихревой диффузией из каналов сырья. Поэтому целесообразно применить экспериментальное моделирование и использовать метод «анализа размерностей».

5. 2. Вибрационные поля

Сообщение частицам инерционных ускорений способствует облегчению выхода паровой фазы из сырья, знакопеременному изменению скорости частицы относительно потока воздуха. Совместно с электромагнитным способом подвода энергии происходит одновременная интенсификация как внешнелиффузионных, так и внутренилиффузионных процессов массопереноса (рис. 4).

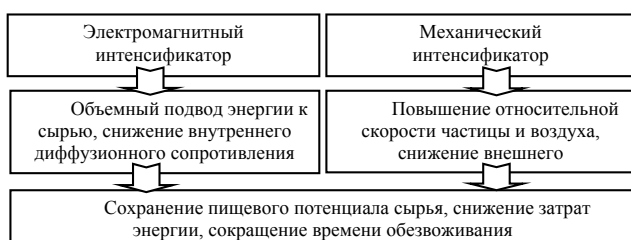


Рис. 4. Теплофизическая модель вибрационного механизма

Если в аппарате используется традиционный источник подвода энергии, то влияние на внутренние процессы массопереноса будет отсутствовать (рис. 5) и результат станет в большей степени определяться размерами частицы.

5. 3. Числа волнового подобия

Специфика поставленных задач связана с тем, что необходимо учесть влияние силовых воздействий на элементы сырья при комбинированных действиях разных по физической природе сил. Представляется, что логично определить отдельно влияние специфики энергетического действия и механического.

Для учета влияния электромагнитного поля при сушке сырья автором [11] предложено число энергетического действия (число Бурдо). Это число выражается отношением энергии, затраченной на организацию процесса (Q_d), к физически необходимой. Теоретической считается энергия, которая необходима для перевода в пар всей удаляемой из сырья влаги (Q_r).

Из теплового баланса теоретический расход энергии пропорционален массовому расходу удаляемой влаги (M) и удельной теплоте фазового перехода. Это число справедливо и для традиционных сушилок, и для инновационных установок. Для установок с ЭМП число энергетического действия будет иметь вид

$$Bu = (Q_d - Q_r) = N(Mr)^{-1}. \quad (8)$$

Соотношение (8) определяет как энергетическую эффективность оборудования, так и режим массопереноса. До определенных значений числа Bu имеют место ламинарные режимы движения жидкости в капиллярных каналах твердой фазы. Число Bu может

показывать условия перехода к более интенсивному массопереносу, который назван режимом турбулентной бародиффузии [12].

Число Bu может использоваться и в других задачах массопереноса при безградиентном подводе энергии (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные модели

Процесс	Число Bu	Модель процесса
инактивация микроорганизмов	$Bu = N(\zeta VC_p \Delta T \rho)^{-1}$	$F_0 = A \cdot Re^n Pr^m Bu^k$
экстрагирование	$Bu = N(rVd^2)^{-1}$	$Sh = A \cdot Re^n Sc^m Bu^k$
сушка	$Bu = N(rV\rho)^{-1}$	$Sh = A \cdot Re^n Sc^m Pe^p Bu^k$

В соотношениях принято: N – мощность излучения; V – объемный расход удаляемой влаги; r – скрытая теплота фазового перехода; d – определяющий размер; ρ – плотность.

Для задач комбинированного взаимодействия внешних полей и продукта в камерных вибрационных сушилках предложены соответствующие числа подобия. В контейнере сушилки за счет вибрации организуется виброкипящий слой. Считаем, что общая гидродинамическая ситуация в аппарате (движение частиц) может характеризоваться суммарной средней скоростью потока, а за это отвечает число Рейнольдса (Re). Однако классическое число Re следует модифицировать, привязав к параметрам, характерным для сушки в вибрационном поле.

Приняв в качестве характерного размера системы диаметр обрабатываемых частиц, а за характерную скорость – частоту вибрации, модифицированное волновое (вибрационное) число Рейнольдса примет вид:

$$Re_B = \frac{\rho d^2 f}{\mu}. \quad (9)$$

Соотношение между конвективным и молекулярными процессами переноса теплоты характеризуется волновым числом Пекле:

$$Pe_B = Re_B \cdot Sc; \quad Pe_B = \frac{\rho d^2 f}{\mu} \cdot \frac{v}{D}; \quad Pe_B = \frac{\rho d^2}{D} \quad (10)$$

а модифицированное вибрационное массообменное число Стантона определяется:

$$St = \frac{\beta}{df}, \quad (11)$$

В соотношениях (9)–(11): $Sc = \frac{v}{D}$ – число Шмидта; d – диаметр частицы; f – частота вибрации; μ – динамический коэффициент вязкости; D – коэффициент диффузии; v – кинематический коэффициент вязкости; β – коэффициент массоотдачи.

Искомое уравнение для волнового числа Стантона в обобщенных переменных примет вид:

$$St_B = A \cdot Re^n Pr^m T^k, \quad (12)$$

где $\Pi = \frac{V_z}{V_n}$ – безразмерный параметрический комплекс загрузки контейнера; V_z – объем загрузки; V_n – объем контейнера; $T = \frac{T_z}{T_n}$ – безразмерная температура; T_z – текущая температура зерна при сушке; T_n – начальная температура зерна.

Для задач ленточных сушилок уравнение (12) следует преобразовать так, чтобы учитывалось действие электромагнитных источников энергии и колебательных механических интенсификаторов. Влияние механических интенсификаторов предлагается учитывать с помощью безразмерного комплекса Ba , который отражает соотношение инерционных сил, которые получают частицы от механических колебаний, и инерционных сил, которые вызваны движением ленты:

$$Ba = \frac{A\omega}{v}. \quad (13)$$

С учетом числа Ba критериальное уравнение (12) примет вид:

$$St = B \cdot Pe^n Bu^m Ba^k. \quad (14)$$

Предложенное уравнение (14) является механико-диффузионной моделью. Модель позволяет рассчитывать конструктивные характеристики аппарата. Дает возможность находить сочетания параметров рабочего режима для электромагнитной сушки зернового продукта в движущемся слое при механической интенсификации процесса.

Для задач безградиентного подвода энергии на эффективный коэффициент массоотдачи β_e влияют: размер частиц d , плотность потока ρ и вязкость μ , коэффициент диффузии D , разность концентраций ΔC и гравитационное поле g . Действие бародиффузии определяется мощностью микроволнового интенсификатора N , удельной теплотой парообразования r . Следует учесть расход продукта (G_{pr}) и экстрагента (G_{ex}):

После составления матрицы размерностей получены комплексы, которые традиционно используются в задачах массообмена (числа Шервуда, Шмидта, Грасгофа). Влияние микроволнового поля учитывается числом $Bu = N/(rG_p)$.

Чем ближе число Bu к 1, тем больше образуется паровой фазы, тем больший градиент давлений и более интенсивные выбросы насыщенного экстракта из капилляров, и больше турбулизация приграничного слоя. Следовательно, число Bu может характеризовать не только степень энергетического воздействия, но и соответствующую гидравлическую ситуацию в кассете.

Бародиффузия нивелирует вклад естественной конвекции и число Грасгофа можно исключить из критериального уравнения:

$$Sh = A(Sc)^n (Bu)^m \left(\frac{G_n}{G_p} \right)^k. \quad (15)$$

Аналогично установлена структура критериального уравнения для непрерывного процесса экстрагирования в МВ-поле:

$$St_m = A \cdot Re^m Sc^n Bu^p \Pi^k. \quad (16)$$

Комплекс $\Pi = \frac{k}{H^2}$ является безразмерной параметрической проницаемостью и учитывает геометрию укладки частиц твердого материала.

В уравнениях (11), (14)–(16) константы A , B , n , m , k определяются на основе базы экспериментальных данных.

5. 4. Экспериментальные исследования процесса экстрагирования в микроволновом поле

Исследования процесса экстрагирования проводилось на стендах: № 1 (МВ камера, неподвижный слой сырья) и № 2 (противоточный МВ – экстрактор) в широком диапазоне изменения параметров (табл. 2).

Таблица 2

Диапазон экспериментального моделирования

№	Сырье	Размер частиц $d \cdot 10^3$, м	Температура экстракта t , °С	МВ мощность N , Вт/кг	Re	$\Pi \cdot 10^2$	$Bu \cdot 10^8$
1	Зерна кофе	0,63–3	11–90	90–900	2,7–77,1	99–468	5,2–27,9
2	Зерна кофе	0,8–3	11–90	630–900	2,7–77,1	99–468	5,2–27,9
3	Шлам кофе	0,5–1,5	30–70	270–900	35,7–41,5	93,3–1062,5	3,8–15,2
4	Шлам кофе	0,5–1,5	30–70	270–900	35,7–41,5	93,3–1062,5	3,8–15,2

Опыты № 1 и № 3 проводились на стенде № 1, а № 2 и № 4 – на стенде № 2. На первом этапе установлены концентрации водорастворимых веществ в сырье (рис. 5) проведены стендовые исследования гидравлических характеристик массообменных кассет при продольном проходе воды сквозь слой зерен и шлама.

При всех значениях слоя шлама 27 мм, 20 мм, 14 мм полученные зависимости – это выпуклые кривые, в то время как классическая зависимость имеет вогнутый характер. В опытах с кофейными зёрнами (рис. 6) для целых зерен (линия 7), для фракций 2,5...3 мм (линия 6) и 1/4 зерен (линия 5) гидравлические линии подобны классическим. Но для фракций 2...2,5 мм (линия 4), половинок зерен (линия 3), фракций 1...2 мм (линия 2) и фракций меньше 0,8 мм (линия 1) эти зависимости становятся выпуклыми.

Объясняется этот «парадокс» тем обстоятельством, что горизонтальные потоки сообщают энергию частицам кофейного сырья, толщина и пористость слоя растет. В результате наблюдается снижение гидравлического сопротивления слоя. Это свидетельствует о благоприятном для процессов экстрагирования явлении: гидродинамическая ситуация с таким псевдооживлением слоя однозначно будет способствовать интенсификации процессов переноса.

Высота слоя продукта в кассете измерялась погружением измерительного устройства непосредственно в кассету. Для частиц кофе разного размера получены различные гидравлические характеристики.

Установлено, что для обеспечения тонкослойных течений в продукте, повышения поверхности фазового контакта целесообразно работать в диапазонах расхо-

дов $1,4 \cdot 10^{-6} \dots 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ и при значениях толщины слоя кофейного сырья $1 \cdot 10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Для частиц дисперсностью меньше 1,5 мм гидравлические характеристики принимают вид, характерный для процессов псевдоожижения. Базы экспериментальных данных (рис. 6) обобщены моделью:

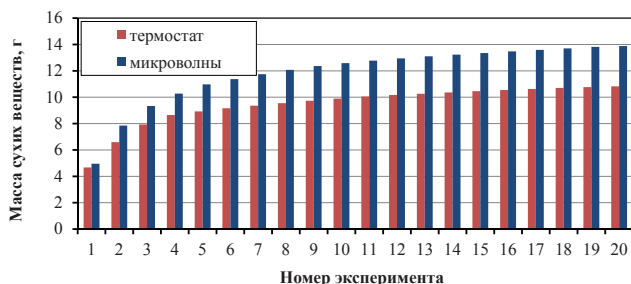


Рис. 5. Содержание экстрактивных веществ в зернах кофе

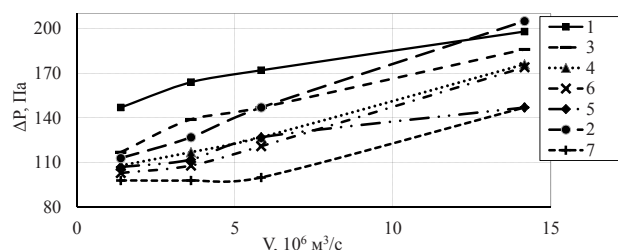
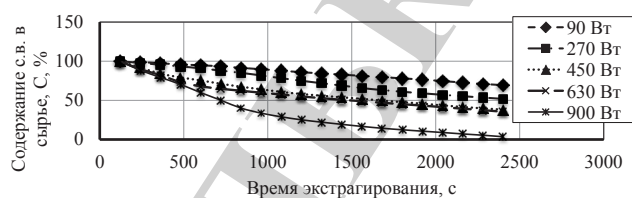


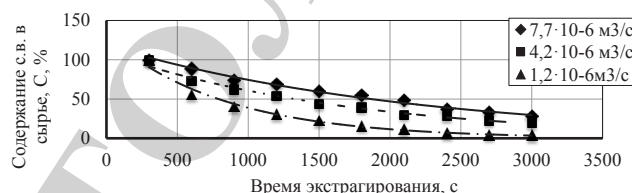
Рис. 6. Гидравлические характеристики касет микроволнового экстрактора: 1 – меньше 0,8 мм; 2 – 1...2 мм; 3 – 1/2 кофейного зерна; 4 – 2...2,5 мм; 5 – 1/4 кофейного зерна; 6 – 2,5...3 мм; 7 – целое кофейное зерно

На втором этапе исследовалась (рис. 7) кинетика массопереноса в системе «кофейное сырье – вода».

Исследовалось влияние режимных параметров на кинетику массопереноса при экстрагировании в МВ-поле (рис. 7). Установлено, что при увеличении объемного расхода экстрагента в 3 раза выход экстрактивных веществ из кофейного сырья повышается на 35 % и сокращается время экстрагирования в 2 раза.



а



б

Это объясняется фактором существенного снижения внешнего диффузионного сопротивления. При увеличении скорости потока в 2,5...3,5 раза эффективный коэффициент массоотдачи увеличивается в 2,7...5 раз соответственно. Рекомендуется для расчета интенсивности массопереноса при экстрагировании из кофейного сырья в условиях действия микроволнового поля следующее соотношение:

$$St_m = 0,004 \cdot (Re)^{-0,5} (Sc)^{0,43} (\Pi)^{0,6} (Bu)^{0,33} \quad (18)$$

Соотношение (18) является ключевым в методике расчета и оптимизации микроволновых экстракторов кофе.

5.5. Экспериментальные исследования процессов сушки в вибрационном и микроволновом поле

Исследования процесса сушки проводилось на стендах: № 3 (камера неподвижный слой сырья) и № 4 (ленточная установка с ИК- и МВ-интенсификаторами) в широком диапазоне изменения параметров (табл. 3).

В опытах на вибрационной сушилке последовательно изучалось влияние режимных факторов на интенсивность массопереноса. При этом начальное влажосодержание равнялось: $W=11,7; 14; 16 \%$, показатели загрузки контейнера $\Pi=0,67; 0,5$ та $0,33$ (рис. 8, а), частоты вибрации $f=80; 10; 120 \text{ с}^{-1}$ (рис. 8, б). Скорость потока воздуха составляла 1,2 м/с. Типичные зависимости влияния ключевых параметров на характер линий сушки приведены на рис. 8.

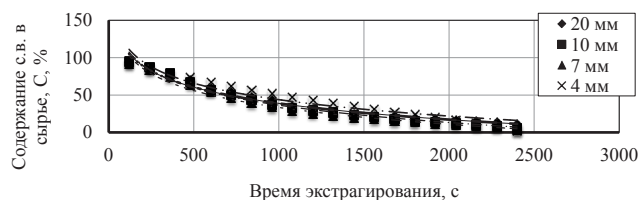
При выборе параметров вибрации рабочего контейнера ставились задачи:

- обеспечить максимальную интенсивность сушки;
- организовать слой сырья, который равномерно высушивается и интенсивно перемешивается;
- исключить перегрев частиц;
- поддерживать существование кипящего слоя.

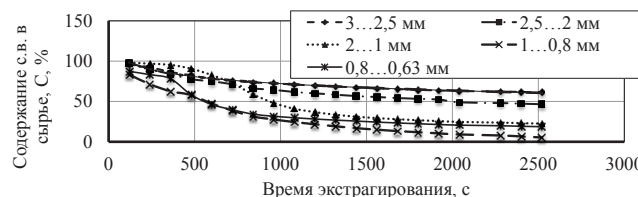
Таблица 3

Диапазон экспериментального моделирования

№	Сырье/стенд	$t, ^\circ\text{C}$	кВт/м^2	кг/м^2	$w_n, \%$	$w_n, \%$	$J, \text{МДж/кг-уд.вл}$
1	подсолнечник/№ 3	28...44	7,33...27,51	1,8...3,6	16,7	2	3,67...3,80
2	соя /№ 4	36...49	7,33...27,51	2,8...5,6	24,3	3	3,84...4,36



б



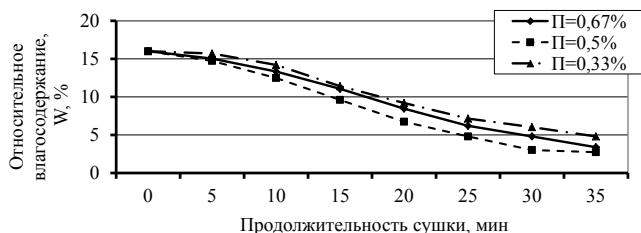
в

Рис. 7. Кинетика массопереноса водорастворимых веществ в МВ-поле: а – влияние мощности МВ-поля; б – толщины слоя; в – расхода экстрагента; г – размера фракций

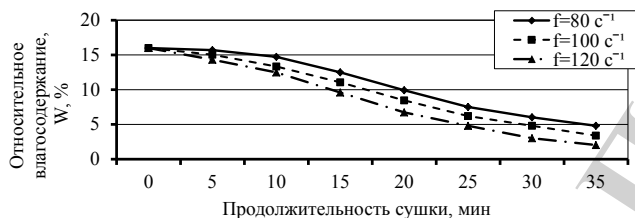
Обобщение полученной базы экспериментальных данных установило искомое критериальное уравнение:

$$St_B = 97.4 Re_B^{0.76} \Pi^{0.91} T^{3.1}. \quad (19)$$

Опыты с кофейным шламом определили, что при увеличении количества подводимой энергии в три раза, скорость удаления влаги растет на 30 %. В среднем скорость сушки составляет 1,3...1,7 %/мин. Производительность установки в режиме загрузки 3 кг/м² при скорости ленты 0,33 см/с составила 1,5 кг/ч сухого шлама влажностью 10 %. Опыты проводились при значениях удельной загрузки 1,2...3,3 кг/м². Наблюдалось снижение скорости удаления влаги при загрузке большей, чем 2,5 кг/м².



а



б

Рис. 8. Кинетика процесса сушки подсолнечника в вибросушилке при изменении: а – загрузки контейнера; б – частоты вибрации

Увеличение количества ИК-модулей от 1 до 3 повышает скорость сушки в 1,5 раза. На ленточной ИК-сушилке проводились опыты с вареным горохом. Экспериментальные исследования процесса сушки вареного гороха определили влияние удельной нагрузки на ленту и удельной мощности нагревателей на главный показатель – скорость сушки (рис. 9).

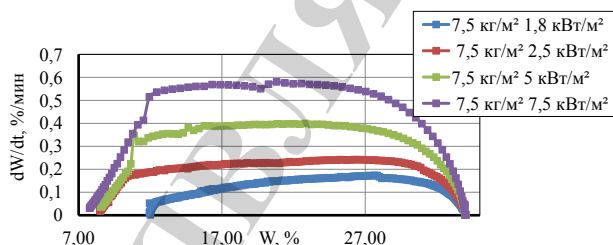


Рис. 9. Влияние мощности подводимой энергии

Проведены исследования процесса сушки семян подсолнечника (рис. 10, 11)

Опыты проводились на одном модуле, на ленте перемещались кассеты, заполненные семенами подсолнечника. После прохождения модуля каждая кассета

взвешивалась. По убыли массы строились кинетические зависимости.

С повышением плотности теплового потока пропорционально увеличивалась скорость сушки (рис. 11).

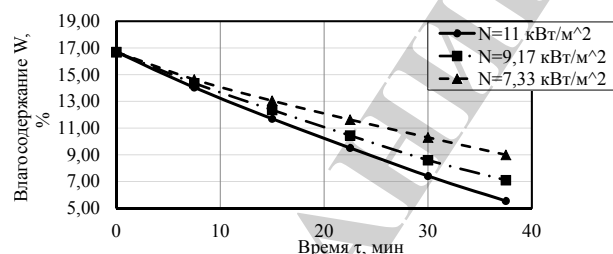


Рис. 10. Линии сушки семян подсолнечника на ленточной ИК-сушилке

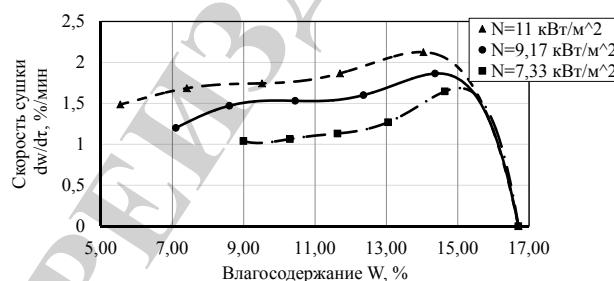


Рис. 11. Линии скорости сушки семян подсолнечника

Существенно влияет и вид подводимой энергии. Если для известных [13, 14] установок достигнутые скорости сушки составляли 0,32 %/мин, то на вибрационной сушилке получено 0,4 %/мин (рис. 8), а на ленточной ИК-сушилке этот параметр составлял 0,75 %/мин при сушке гороха (рис. 10) и 1,75 – при сушке шлама и семян подсолнечника (рис. 12\1).

Сделан вывод, что число модулей, расстояние между ними, скорость движения ленты, мощность ИК-источателей и удельная нагрузка ленты продуктом – это сложная многопараметрическая задача оптимизации, которая имеет самостоятельное решение для каждого вида продукта. Вместе с тем, информация, представленная в разделе, позволяет выполнить проектные работы по созданию конструкции ИК-сушилки и проводить модернизацию традиционных ленточных сушилок – перевод на частичное или полное использование ИК-нагревателей.

6. Обсуждение результатов и оптимизация инновационного оборудования

Разработана методика расчета и оптимизации непрерывного противоточного экстрактора системы «кофейное сырье – вода». Компьютерный эксперимент показал, что удельный расход энергии составляет 220...370 кДж на 1кг извлеченных сухих веществ. Наибольшее влияние на процесс экстрагирования под воздействием МВ-поля оказывают: выходная мощность магнетронов, производительности по сырью и экстрагенту и высота слоя сырья в массообменном модуле.

С учетом структуры разработанной математической модели экстрактора использован метод опти-

мизации параметров установки. Метод основан на исследовании пространств параметров R_n путем равномерного заполнения этих пространств точками x_j , $j=1, 2, \dots, N$, по всему пространству.

В каждой из x_j вычисляется значение целевой функции Z . Полученная информация используется в процедуре совершенствования задачи и оптимизации решения [15].

С экономической точки зрения целесообразно учесть годовое потребление электроэнергии, капитальные затраты на изготовление установки и стоимость продукции в критерии оптимизации. Для упрощения задачи имеет смысл учитывать в критерии только переменную составляющую:

$$Z = \max(Pr \cdot Y - K_c - C_{EC} \cdot \Pi_{EC}), \quad (20)$$

где Π_{EC} – годовое потребление энергии, кВт·ч; C_{EC} – стоимость единицы энергии, грн/кВт·ч; K_c – стоимость установки, грн; Pr – цена готового продукта; Y – производительность установки. Оптимизация установки – это поиск максимального значения целевой функции Z .

Для функции Z (20) оптимизируемыми параметрами являются: высота слоя в каскаде δ , температура нагрева экстрагента t , гидромодуль q , размеры массообменного модуля (L , B , h), количество модулей по высоте установки n . Для решения задачи выбран метод покоординатного спуска Гаусса-Зейделя, который является классическим итерационным методом. Метод сводит задачу поиска наибольшего значения функции нескольких переменных к многократному решению одномерных задач оптимизации. Применялась программа «EXTRACTOR.2» написанная на языке программирования Pascal, в среде Borland Delphi 7.0.

Реализация алгоритма покоординатного спуска осуществлялась по каждой координате локального оптимума. Определялись поля концентраций в экстракторе (рис. 12). Здесь по оси ординат отложено количество массообменных модулей n , а по оси абсцисс: (1) – изменение концентрации жидкой фазы (экстрагента) и (2) – твердой фазы по высоте экстрактора H .

Для анализа влияния конструктивных параметров: длины массообменного модуля L , ширины массообменного модуля B , высоты массообменного модуля h и количества массообменных модулей n на технико-экономические показатели проводился компьютерный эксперимент.

Оказалось, что максимум экономической эффективности функционала достигается при значении длины массообменного модуля 937 мм.

В дальнейшем для аппаратов с длиной модуля 0,9 м проведены расчеты функционала при различной ширине модуля. Аналогично проведен анализ влияния всех варьируемых параметров по каждой координате локального оптимума. С увеличением производитель-

ности установки растет функционал Z вследствие более рационального использования энергии. При увеличении мощности в 4,5 раз Z возрастает в 8 раз.

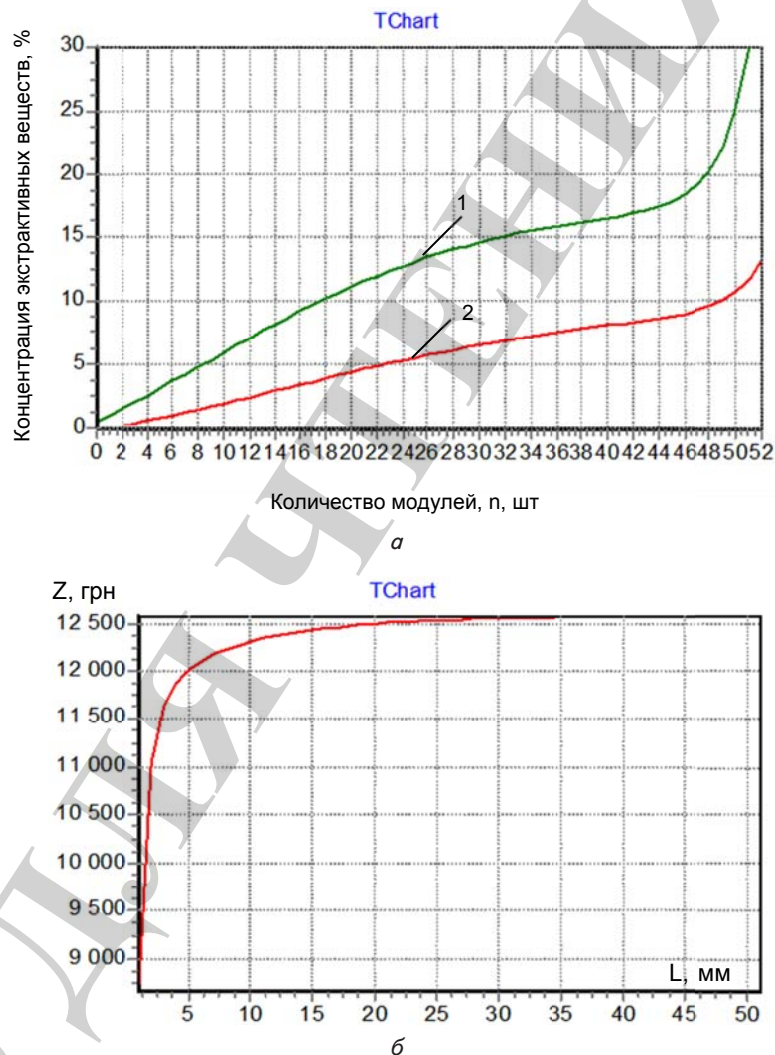


Рис. 12. Компьютерное моделирование: а – распределение концентрации экстрактивных веществ по модулям соответствующее локальному максимуму Z

По итогам оптимизации разработан типоразмерный ряд микроволновых экстракторов непрерывного действия.

7. Выводы

1. Локальное действие на наномасштабные элементы пищевого сырья позволят дать принципиально новые подходы организации пищевых технологий. По сути, это новое научное направление – пищевые наноэнерготехнологии. Мощным средством инициирования возникновения нанокинетики является импульсное электромагнитное поле. Комбинированное воздействие вибрационного и электромагнитного полей способно существенно интенсифицировать процессы тепломассообмена.

2. Эффективность извлечения влаги из твердой фазы зависит от согласования продолжительности и мощности волновых воздействий. При малой про-

должительности может не успеть сформироваться поток влаги из нано- и микрокапилляров. При большой продолжительности и мощности возможен нежелательный перегрев твердой фазы. При более тонкой организации энергоподвода целесообразно менять параметры ЭМП во времени в соответствии с мгновенными значениями диэлектрических характеристик твердой фазы (наличия и количества в каналах влаги). Мощность электрофизического

воздействия следует согласовывать и с диаметрами каналов – в более мелких каналах требуется больший перепад давлений для возникновения бародиффузионного потока.

3. Научные гипотезы подтверждены на практике. В технологии кофе степень извлечения компонентов из зерен повышалась на 15 %, а затраты энергии снижались на 50 %. Опытные образцы 60 % концентрата кофе имеют высокие вкусовые характеристики.

Литература

1. Weibbach, D. Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants [Text] / D. Weibbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlieb, A. Hussein // *Energy*. – 2013. – Vol. 52. – P. 210–221. doi: 10.1016/j.energy.2013.01.029
2. Gromadzki, G. Energy game: Ukraine, Moldova and Belarus between the EU and Russia [Text] / G. Gromadzki, W. Konończuk; Stefan Batory Found. – Warsaw: Stefan Batory Found, 2007. – 47 p.
3. Бурдо, О. Г. Энергетика экоииндустрии пищевых концентратов [Текст] / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, Ю. О. Левтринская // *Проблемы региональной энергетики*. – 2015. – Т. 3, № 29. – С. 112–118.
4. Sorour, M. A. Optimization of Multiple Effect Evaporators Designed for Fruit Juice Concentrate [Text] / M. A. Sorour // *American Journal of Energy Engineering*. – 2015. – Vol. 3, Issue 2. – P. 6. doi: 10.11648/j.ajee.s.2015030201.12
5. Khajehei, F. Production of Pomegranate Juice Concentrate by Complete Block Cryoconcentration Process [Text] / F. Khajehei, M. Niakousari, M. H. Eskandari, M. Sarshar // *Journal of Food Process Engineering*. – 2015. – Vol. 38, Issue 5. – P. 488–498. doi: 10.1111/jfpe.12179
6. Chantasiriwan, S. Simulation of quadruple-effect evaporator with vapor bleeding used for juice heating [Text] / S. Chantasiriwan // *International Journal of Food Engineering*. – 2016. – Vol. 2, Issue 1. – P. 36–41.
7. Fazaeli, M. Effects of heating method and conditions on the evaporation rate and quality attributes of black mulberry (*Morus nigra*) juice concentrate [Text] / M. Fazaeli, G. Hojjatpanah, Z. Emam-Djomeh // *Journal of Food Science and Technology*. – 2011. – Vol. 50, Issue 1. – P. 35–43. doi: 10.1007/s13197-011-0246-y
8. Aloqbi, A. Antioxidant Activity of Pomegranate Juice and Punicalagin [Text] / A. Aloqbi, U. Omar, M. Youss, M. Grace, M. A. Lila, N. Howell // *Natural Science*. – 2016. – Vol. 08, Issue 06. – P. 235–246. doi: 10.4236/ns.2016.86028
9. Азоев, Г. Л. Рынок нано: от нанотехнологий к нанопродуктам [Текст] / Г. Л. Азоев и др.; под. ред. Г. Л. Азоева. – М.: БИНОМ, 2011. – 319 с.
10. Burdo, O. Using of the wave technologies in intensification processes of heat and mass transfer [Text] / O. Burdo, V. Bandura, A. Zykov, I. Zozulyak, J. Levtrinskaya, E. Marenchenko // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2017. – Issue 4. – P. 18–24. doi: 10.21303/2461-4262.2017.00399
11. Бурдо, О. Г. Пищевые наноэнерготехнологии [Текст] / О. Г. Бурдо. – Херсон: ГРИНЬ Д.С., 2013. – 294 с.
12. Бурдо, О. Г. Принципы направленного энергетического действия в пищевых нанотехнологиях [Текст] / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, В. Н. Бандура // *Проблемы региональной энергетики*. – 2015. – Т. 1, № 27. – С. 79–85.
13. Потапов, В. А. Повышение энергоэффективности сушки виноградных выжимок в массообменном модуле с кондуктивным подводом теплоты [Текст] / В. А. Потапов, Е. Н. Якушенко // *Наук. праці Од. націон. акад. харчових технологій*. – 2013. – Т. 2, № 43. – С. 179–184.
14. Bernic, M. Drying Kinetics of Sunflower Seeds using Pulsed UHF Energy Intake [Text] / M. Bernic, M. Raducan, E. Ciobanu // *TEM Journal*. – 2013. – Vol. 2, Issue 4. – P. 305–308.
15. Burdo, O. G. The Nanotechnological Innovation in Food Industry [Text] / O. G. Burdo, A. V. Zykov, S. G. Terziev, N. V. Ruzhitskaya // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. – 2016. – Vol. 6, Issue 3 – P. 144–150.